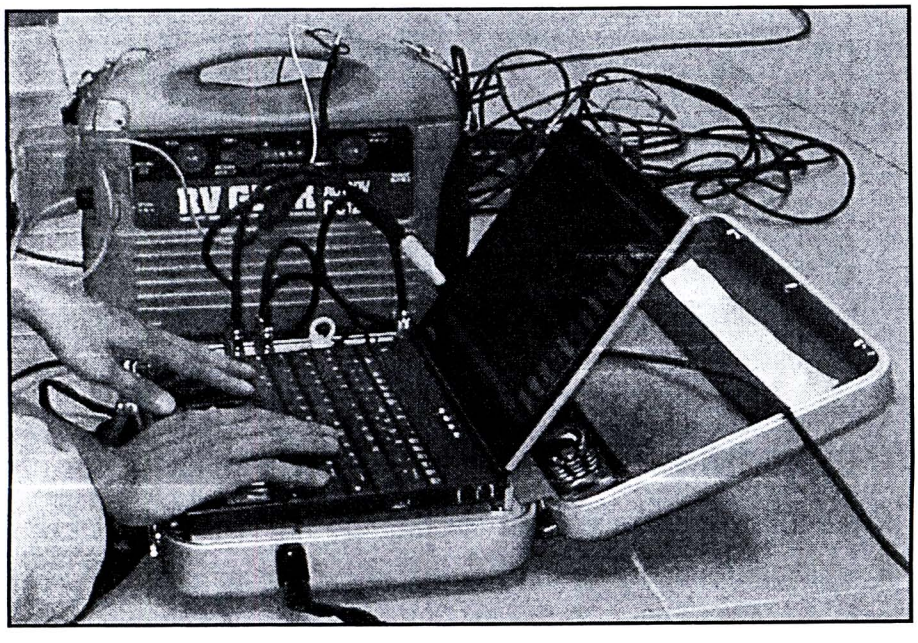
บทที่ 3 ทฤษฎีและระเบียบวิธีที่ใช้วิจัย

3.1 การเตรียมความพร้อมสำหรับการตรวจวัดแบบ Ambient Vibration และ Microtremor

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร และคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินด้วยการตรวจวัด โดยใช้การตรวจวัดแบบ Ambient vibration หรือ Microtremor ซึ่งเป็นการตรวจวัดการสั่นไหวของอาคาร หรือการสั่นสะเทือนที่พื้นผิวดิน ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระตุ้นตามธรรมชาติและไม่ได้ใช้แหล่งกระตุ้นจากภายนอกใด ๆ ดังนั้น เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดจะต้องมีความสามารถในการตรวจวัดที่ระดับการสะเทือนต่ำมาก ๆ ได้ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์วัดความเร็ว (Velocity Sensor) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Instrument)

อุปกรณ์รับข้อมูลมีชื่อว่า GEODAS-10-24DS ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งพัฒนาโดย Buttan Service Co,Ltd. ของประเทศญี่ปุ่นและมีคุณสมบัติของเครื่องดังตารางที่ 3.1



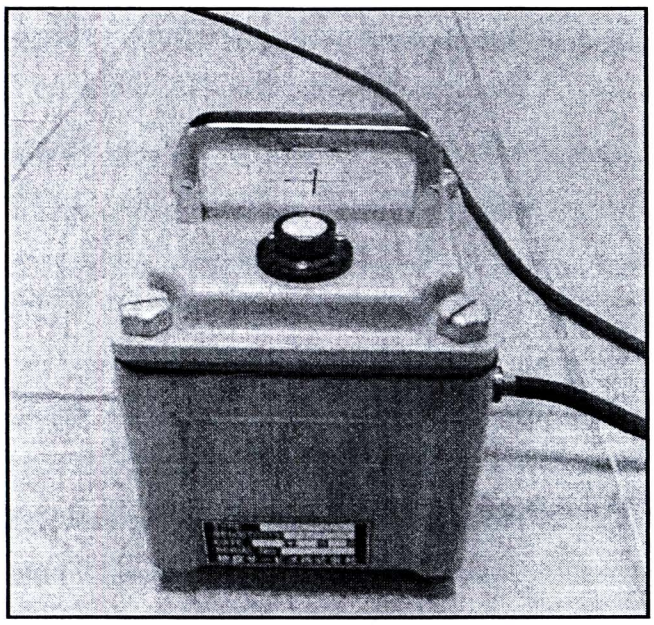
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data Acquisition Instrument) GEODAS-10-24DS

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับข้อมูล GEODAS-10-24DS

จำนวนช่องสัญญาณวัด	8 หรือ 24 ช่อง
A/D Conversion Method	$\Delta - \sum$ Over Sampling (ทุกช่องสัญญาณที่วัดพร้อมกัน)
A/D Resolution/Dynamic Range	24 Bit
A/D Conversion Speed (Stationary)	50kHz
Signal Voltage(Full Scale)	$\pm$ 2.5 V.
Sampling Rate (Frequency)	50/100/200/500/1K/2K Hz
Pre-Amplifier Impedance	10 $k\Omega$
Pre-Amplifier Gain	0/20/40/dB
Low-Pass Filter	12.4/50/150/0 Hz
แหล่งจ่ายไฟ	DC.12 V.
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้	36 VA(Maximum)
อุณหภูมิที่เหมาะสม	10-45 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	20-80%
ขนาด (กว้างxยาวxสูง)	367x270x90 (mm.)
น้ำหนัก	5 kg.

3.1.2 หัววัดสัญญาณ (Sensor)

หัววัดสัญญาณมีชื่อว่า CR4.5-2S ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งพัฒนาโดย Buttan Service Co,Ltd. ของประเทศญี่ปุ่น เช่นเดียวกับอุปกรณ์รับข้อมูล ซึ่งสามารถวัดทิศทางการสั่นได้ 3 ส่วน (Component) คือ 1 แนวดิ่ง และ 2 แนวระนาบ มีคุณสมบัติของเครื่องดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หัววัดสัญญาณ (Sensor) CR4.5-2S

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของหัววัดสัญญาณ (Sensor) CR4.5-2S

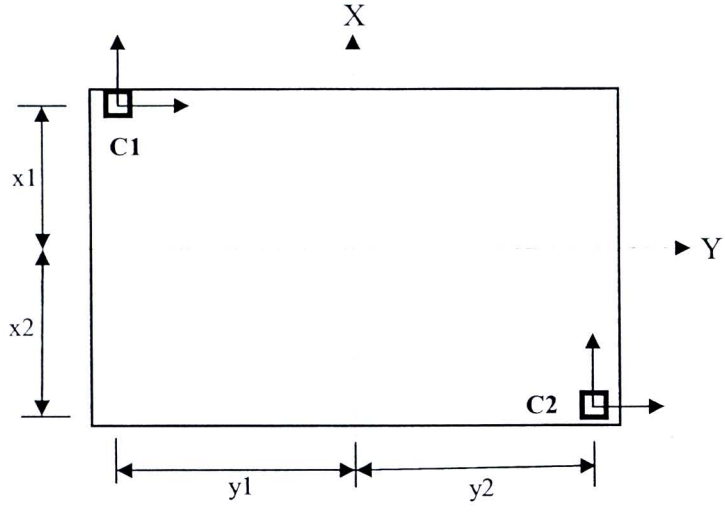
จำนวนทิศทางที่วัดได้ (Component)	3 (1 แนวดิ่งและ 2 แนวระนาบ)
Element	4
Coil Reactance	4 $k\Omega$
Natural Period (Frequency)	2 s(0.5Hz)
Sensitivity	1.0V./cm/s
Available Frequency Range	0.5-20 Hz (-3dB)
Available Stroke	$\pm$ 1 mm.
แหล่งจ่ายไฟ	DC.12 V. (จาก GEODAS)
ขนาด (กว้างxยาวxสูง)	100x100x105 (mm.)
น้ำหนัก	1.2 kg.

3.2 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่สำคัญประกอบด้วย ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency), อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) และรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) โดยที่การตรวจวัดเพื่อนำรูปแบบสัญญาณผลตอบสนองไปวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์มีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การตรวจวัดค่าความถี่ธรรมชาติ

เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดทั้งหมดจะเริ่มติดตั้งที่ชั้นบนสุดของอาคาร (รูปที่ 3.3) เนื่องจากสำหรับการสั่นไหวในรูปแบบแรก ๆ การเคลื่อนที่ของอาคารที่ชั้นบนสุดจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งทำให้การวัดสัญญาณผลตอบสนองมีความชัดเจนมากกว่าชั้นที่ต่ำลงมา นอกจากนั้น ที่ชั้นบนสุดของอาคารมักเป็นพื้นที่โล่งทำให้สะดวกต่อการตรวจวัด เมื่อนำผลการตรวจวัดไปวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยการแปลงจากค่าที่บันทึกอ้างอิงกับเวลา (ใน Time domain) เป็นค่าที่อยู่ใน Frequency domain ในรูปแบบ Fourier Magnitude Spectrum ซึ่งผลที่ได้เป็นความสัมพันธ์ของระดับผลตอบสนองกับความถี่ในการสั่นไหว โดยมีลักษณะที่มียอดแหลมของค่า Spectrum ที่ตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร



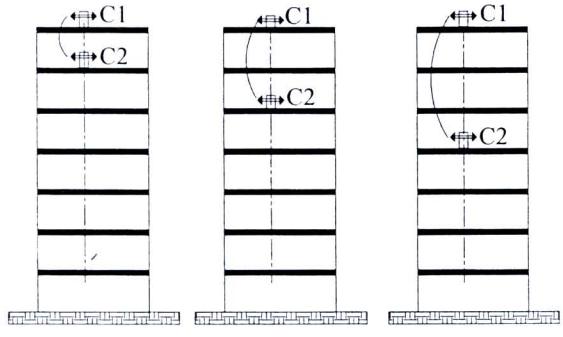
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งหัววัดความเร็ว

3.2.2 การตรวจวัดรูปร่างการสั่นไหว (Vibration Mode Shape)

การติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็วเพื่อทำการตรวจวัดรูปร่างการสั่นไหว สามารถใช้วิธีการเดียวกับการตรวจวัดหาค่าความถี่ธรรมชาติ สำหรับกรณีการหารูปร่างการสั่นไหวด้านผังอาคารหรือในแนวราบ ส่วนกรณีการหารูปร่างการสั่นไหวด้านข้างอาคารหรือในแนวดิ่ง ต้องมีวิธีการติดตั้งหัววัดของเครื่องมือที่แตกต่างจากการหารูปร่างการสั่นไหวในแนวผังอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยที่ตำแหน่งของหัววัดจะต้องติดตั้งที่ชั้นบนสุด 1 ตัวเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง ส่วนหัววัดตัวที่ 2 จะถูก

ย้ายมาติดตั้งชั้นที่ต่ำกว่าลงมาเรื่อยๆจนถึงชั้นล่างสุด การย้ายหัววัดนี้จะต้องวางที่แนวดิ่งเดียวกัน อาจเป็นช่องบันไดหรือลิฟต์ และจะต้องทำการบันทึกสัญญาณ 1 ครั้ง ที่แต่ละชั้นที่คู่กัน

การหารูปแบบการสั่นไหวในผังอาคารของอาคารทั้งการเคลื่อนที่ (Translation) และ การบิดตัว (Torsion) สามารถพิจารณาจากขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ระหว่างหัววัด (ความต่างเฟส) ของ Fourier Magnitude ที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ตรวจวัด, ขนาดของ Fourier Magnitude จะมีขนาดสูงกว่าในกรณีที่เป็นทิศทางการเคลื่อนที่หลักของความถี่นั้นสำหรับการสั่นไหวแบบเคลื่อนที่ (Translation) และในกรณีที่เป็นการบิดตัว (Torsion) จะต้องพิจารณาค่าขนาดของ Fourier Magnitude ประกอบกับค่าความต่างเฟสด้วย กรณีที่ความต่างเฟสระหว่างตำแหน่งและทิศทางของหัววัดทั้งสองเท่ากับศูนย์หมายถึง ทั้งสองตำแหน่งและทิศทางของหัววัดมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน (Translation) และกรณีที่ความต่างเฟสเท่ากับ 180 องศา หมายถึง ทั้งสองตำแหน่งและทิศทางของหัววัดมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน (Torsion) จากการตรวจวัดอาคารส่วนมากมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและการจัดวางองค์อาคารไม่มีความสมมาตรทำให้ Center of mass และ Center of rigidity ของแต่ละชั้นไม่ตรงกัน ส่งผลให้รูปแบบการสั่นไหวไม่สามารถแยกกันได้อย่างชัดเจน เช่น กรณีที่มีการเคลื่อนที่ที่เกิดจากความถี่ใดๆ ของอาคารมีทิศทาง Y เป็นทิศทางการเคลื่อนที่หลัก แต่ขณะเดียวกันก็มีผลของการเคลื่อนที่ของทิศทาง X ผสมอยู่ด้วย



รูปที่ 3.4 การวัดรูปแบบการสั่นไหวแนวด้านข้างอาคาร

3.2.3 การคำนวณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

ในการศึกษาวิจัยนี้ คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปแบบการสั่นไหว ของอาคาร จะถูกคำนวณจากผลการตรวจวัดโดยวิเคราะห์ข้อมูลในเชิง Frequency Domain หลักพื้นฐานของวิธีนี้สามารถอธิบายได้จาก เมื่อพิจารณาระบบโครงสร้างที่ถูกกระตุ้นด้วยแรงพลวัติแบบฮาร์โมนิคที่มีความถี่หนึ่งๆ ระบบจะมีผลตอบสนองด้วยความถี่ของการกระตุ้นนั้น และผลตอบสนองจะมีขนาดสูงสุดเมื่อความถี่ของการกระตุ้นมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ ของระบบนั้น (ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของระบบอาจมีได้มากกว่าหนึ่งค่า) และความสัมพันธ์ของผลการตอบสนองกับความถี่ของการกระตุ้นในรูปของกราฟจะมีลักษณะเป็นยอดแหลมในบริเวณของค่าความถี่ธรรมชาติต่างๆของระบบนั้น และความสูงของยอดแหลมจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับค่าอัตราส่วนความหน่วงประจำรูปแบบการสั่นไหวนั้นๆ นอกจากนี้แล้ว รูปแบบ

การสั่นไหวของระบบสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาอัตราส่วนของความสูงของยอดแหลม ที่ความถี่ธรรมชาติประจำรูปแบบการสั่นไหวนั้นๆของผลตอบสนอง ณ ตำแหน่งต่างๆ

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ วิธีการที่จะควบคุมแรงกระตุ้นให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ อาจมีข้อจำกัดโดยเฉพาะกับโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในการศึกษานี้ ดังนั้น แนวคิดสำหรับการใช้ผลตอบสนองเนื่องจากแรงจากสภาพแวดล้อม (Ambient Vibration) โดยใช้ทฤษฎีของ Random Vibration ช่วยในการวิเคราะห์ กล่าวคือ ด้วยสมมุติฐานที่ว่า แรงกระตุ้นจากสภาพแวดล้อมมีลักษณะที่เป็นส่วนผสมของแรงหลายชนิดจากแหล่งต่างๆ ซึ่งอาจพิจารณาว่ามีองค์ประกอบของความถี่ผสมอยู่มากมาย เป็นช่วงความถี่กว้าง (Wide Band) เมื่อแรงลักษณะนี้กระทำต่อโครงสร้างซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐาน ที่มีความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงประจำรูปแบบการสั่นไหวใดๆ จึงพิจารณาได้ว่า โครงสร้างถูกแรงกระทำที่มีส่วนผสมของความถี่หลายๆค่า ดังนั้น ผลการตอบสนองจึงเป็นการผสมกันของผลตอบสนองในแต่ละองค์ประกอบของความถี่ และมีค่ามากสำหรับองค์ประกอบที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ หรือการสั่นพ้อง (Resonance) และสำหรับระบบโครงสร้างในปัญหานี้ การตอบสนองในแต่ละทิศทางจะมีค่าความถี่ธรรมชาติแต่ละค่าแตกต่างกันชัดเจน และมีค่าอัตราส่วนความหน่วงค่อนข้างต่ำ ทำให้เส้นกราฟแสดงผลตอบสนองของระบบที่ความถี่ต่างๆ ของแรงกระตุ้น จึงมียอดแหลมปรากฏค่อนข้างชัดเจน ดังนั้น ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ต่างๆจึงสามารถประเมินได้

3.2.4 การวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหว

รูปแบบการสั่นไหวของอาคารโดยทั่วไปจะพิจารณาที่ชั้นบนสุดของอาคารที่จุดศูนย์กลางการหมุน โดยที่จุดศูนย์กลางการหมุนจะหาได้จาก Fourier Magnitude ของผลตอบสนองจากหัววัดทุกเครื่องในทิศทางเดียวกัน รูปแบบการสั่นไหวจะเกิดขึ้นได้ 3 แบบ คือ Translation ในทิศ X, Translation ในทิศ Y และ Torsion รอบจุดศูนย์กลางการหมุน อาคารส่วนมากจะไม่เกิดรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งอย่างชัดเจน โดยที่ค่า Discrete Fourier Magnitude ของผลตอบสนองที่ความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่งจะมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการสั่นไหวตามสมการที่ 3.1

$$\frac{|F_{x1}(\omega_1)|}{|F_{x2}(\omega_2)|} = \frac{\Phi_{11}}{\Phi_{21}} \qquad (3.1)$$

โดยที่ $|F_{x1}(\omega_1)|$ คือ Discrete Fourier Magnitude ของผลตอบสนองที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ ω_1 ที่ตำแหน่ง X_1 ของชั้นบนสุด

$|F_{x2}(\omega_1)|$ คือ Discrete Fourier Magnitude ของผลตอบสนองที่ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ ω_2 ที่ตำแหน่ง X_2 ของชั้นบนสุด

Φ_{11} คือ รูปแบบการสั่นไหวที่ชั้นบนสุด ในทิศทาง 1 ที่ตำแหน่ง X_1

Φ_{21} คือ รูปแบบการสั่นไหวที่ชั้นบนสุด ในทิศทาง 1 ที่ตำแหน่ง X_2

3.3 การพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารสำหรับการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

จากข้อมูลคาบธรรมชาติของอาคารที่ได้จากการตรวจวัดสามารถนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อพัฒนาเป็นสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารสำหรับการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวได้ ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยในต่างประเทศที่ดำเนินการพัฒนาสูตรการประมาณได้พบว่า ค่าคาบธรรมชาติที่จำแนกตามลักษณะของโครงสร้างอาคารมีค่าขึ้นกับความสูงของอาคารเป็นหลัก โดยไม่ได้มีการเสนอสูตรการประมาณให้มีความสัมพันธ์กับความกว้างหรือความลึกของอาคาร

สำหรับสูตรโดยประมาณของคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในรูปทั่วไปสามารถแสดงได้ดังนี้

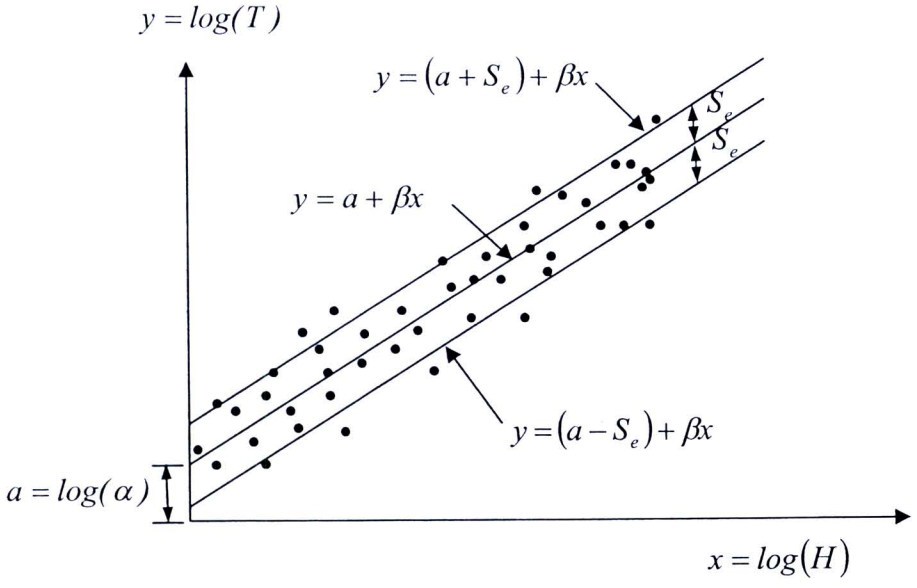
$$T = \alpha H^{\beta} \tag{3.2}$$

α และ β คือ ค่าคงที่ซึ่งจะคำนวณมาจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยใช้วิธี Regression Analysis จากสมการที่ 3.2 แปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$y = a + \beta x \tag{3.3}$$

โดยที่ $y = log(T)$, $a = log(\alpha)$ และ $x = log(H)$

จากสมการที่ 3.3 เป็นสมการเส้นตรงโดยจุดตัดแกน y ที่ a เมื่อ $x = 0$ และสมการเส้นตรงมีความชันเท่ากับ β จากสมการที่ 3.3 แสดงเป็นความสัมพันธ์ในการวิเคราะห์ Regression ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แนวคิดการวิเคราะห์ Regression

จากรูปที่ 3.5 สามารถหาค่า จุดตัดแกน a และ ความชัน β ได้จากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Minimizing the Standard Error) และหาค่า α ได้จากความสัมพันธ์ $a = log(\alpha)$ โดยที่ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error, S_e) สามารถหาได้ดังนี้

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \left(a + \beta x_i \right) \right]^2}{(n-1)}} \tag{3.4}$$

โดยที่ $y_i = log(T_i)$ และ $(a + \beta x_i) = \log(\alpha) + \beta \log(H_i)$ มาจากการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติข้อมูลที่ i โดยที่ n เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมด

ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Regression จากข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคาร สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ α_R และ β สำหรับสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติ โดยเป็นค่าสัมประสิทธิ์ ที่ให้ค่าคาบโดยเฉลี่ยที่ดีที่สุด (T_R) สำหรับชุดข้อมูลการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติทั้งหมด และมีเส้นสมการที่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S_e) ของข้อมูลต่ำที่สุด (Best-Fit) ดังนั้นสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการวิเคราะห์ Regression ในรูปแบบ Best-Fit แสดงได้คือ

$$T_R = \alpha_R H^{\beta} \tag{3.5}$$

ในการนำไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยทั่วไปมักมีการกำหนดให้ค่าคาบธรรมชาติมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง เนื่องจากการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่ต่ำกว่าทำให้การคำนวณค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารมีค่ามากกว่า เป็นผลให้การออกแบบอาคารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น (Conservative) ซึ่งเรียกว่า การประมาณค่าคาบธรรมชาติขอบเขตล่าง (Lower Bound Natural Period, T_L) การประมาณค่า T_L ได้มาจากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับขอบเขตล่าง (α_L) โดยการสร้างเส้นสมการขอบเขตล่างในรูปแบบ Best-Fit ตามสมการที่ 3.3 โดยไม่เปลี่ยนค่า Slope (β) และลบด้วยค่าความผิดพลาดมาตรฐาน โดยมีความหมายว่า มีประมาณ 15 % ของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติที่จะมีค่าต่ำกว่าสูตรการประมาณ T_L ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 3.5 ดังนั้นค่า T_L และค่าสัมประสิทธิ์ α_L คำนวณได้ดังนี้

$$T_L = \alpha_L H^{\beta} \tag{3.6}$$

$$log(\alpha_L) = log(\alpha_R) - S_e \tag{3.7}$$

จากสมการที่ 3.6 ได้ให้ค่าการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่มีความปลอดภัยสูงขึ้น แต่สำหรับข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวโดยทั่วไปได้ยอมให้ใช้วิธีอื่นที่เหมาะสมในการคำนวณค่าคาบธรรมชาติ แต่ได้กำหนดขอบเขตบนที่ค่าจากการคำนวณไม่ควรเกินค่าจากสูตรการประมาณไว้ โดย

สามารถพิจารณาด้วยการหาค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน (Upper Bound Natural Period, T_U) โดยค่า T_U และค่าค่าสัมประสิทธิ์ α_U มีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนกับสมการขอบเขตล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$T_U = \alpha_U H^{\beta} \tag{3.8}$$

$$log(\alpha_U) = log(\alpha_R) + S_e \tag{3.9}$$

3.4 สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารในมาตรฐานการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

ในการคำนวณแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวและผลตอบสนองของอาคาร จำเป็นต้องมีข้อมูลด้านค่าคาบธรรมชาติของอาคาร ซึ่งมีนิยามคือ เวลาที่ใช้ในการสั่นไหวไป-กลับ ครบหนึ่งรอบหากอาคารนั้นสั่นไหวโดยไม่มีแรงภายนอกกระทำขณะสั่นไหว โดยที่ค่าคาบธรรมชาติสามารถหาได้โดยถูกต้องจากการตรวจวัดอาคารโดยตรง อย่างไรก็ตามสำหรับในขั้นตอนการออกแบบ มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวโดยทั่วไปได้เสนอสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติไว้ให้ โดยที่สูตรดังกล่าวใช้สำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติของการสั่นไหวในรูปแบบพื้นฐาน หรือ โหมดที่หนึ่ง และเป็นค่าคาบธรรมชาติสำหรับการสั่นไหวทางด้านข้างของอาคาร โดยมาตรฐานจากต่างประเทศที่เป็นสากลได้เสนอวิธีการหาค่าคาบธรรมชาติไว้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 National Building Code of Canada (NBC)

National Building Code of Canada (NBC) ของประเทศแคนาดา NBCC-2005 หัวข้อ 4.1.8.11.(3) ได้เสนอวิธีการคำนวณคาบธรรมชาติ T_a ไว้ ดังนี้ โดยที่ h_n คือความสูงของอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร และ N คือจำนวนชั้นของอาคาร

a) สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์ที่ต้านทานแรงทางด้านข้างทั้งหมด และไม่ถูกล้อมรอบหรือยึดติดกับชิ้นส่วนที่มีความแข็งแกร่งหรืออาจทำหน้าที่ช่วยรับแรงทางด้านข้างด้วย ให้ใช้ค่าดังนี้
   i) $0.085(h_n)^{3/4}$ สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก
   ii) $0.075(h_n)^{3/4}$ สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต
   iii) $0.1N$ สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์แบบอื่น ๆ
b) $0.025h_n$ สำหรับโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยัน (braced frame)
c) $0.05(h_n)^{3/4}$ สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงสร้างประเภทอื่น ๆ
d) วิธีอื่นใดที่ใช้การจำลองระบบโครงสร้างอย่างเหมาะสม โดยมีข้อยกเว้นคือ

i) สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์ T_a ต้องมีค่าไม่มากกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ a)

ii) สำหรับโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยัน T_a ต้องมีค่าไม่มากกว่า 2.0 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ b)

iii) สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือน T_a ต้องมีค่าไม่มากกว่า 2.0 เท่าของค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ c)

iv) ในการคำนวณการโก่งตัว ให้ใช้ค่าคาบธรรมชาติโดยไม่มีขอบเขตจำกัด

3.4.2 American Society of Engineers (ASCE)

American Society of Engineers (ASCE) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ASCE 7-05 หัวข้อ 12.8.2 คาบธรรมชาติ T_a ให้คำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$T_a = C_t h_n^x$$

โดย h_n คือความสูงของอาคารมีหน่วยเป็นฟุต ค่าสัมประสิทธิ์ C_t และค่ายกกำลัง x คำนวณจากตารางที่ 3.3 โดยที่ตัวเลขแสดงในวงเล็บใช้สำหรับระบบหน่วยเมตริก

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ C_t และค่ายกกำลัง x

ชนิดของโครงสร้าง	C_t	x
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์ที่ต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวทั้งหมดและไม่ถูกล้อมรอบหรือยึดติดกับชิ้นส่วนที่มีความแข็งแกร่งกว่าและช่วยต้านการโก่งตัวเมื่อต้องรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว จำแนกเป็นชนิดดังต่อไปนี้:		
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก	0.028 (0.0724)	0.8
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต	0.016 (0.0466)	0.9
โครงข้อแข็งที่มีการค้ำยันแบบเยื้องศูนย์โครงสร้างเหล็ก (eccentrically braced steel frame)	0.03 (0.0731)	0.75
โครงสร้างประเภทอื่น	0.02 (0.0488)	0.75

นอกจากนั้น ยังยอมให้ใช้สูตรประมาณสำหรับอาคารที่สูงไม่เกิน 12 ชั้น ที่มีระบบต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวทั้งหมดเป็นโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็กหรือคอนกรีต และมีความสูงของชั้นอย่างน้อย 10 ฟุต (หรือ 3 เมตร) ดังนี้

$T_a = 0.1N$

โดย N คือจำนวนชั้น

สำหรับโครงสร้าง Masonry หรือกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีต สามารถใช้สูตรการประมาณ T_a ดังนี้

$$T_a = \frac{0.0019}{\sqrt{C_W}} h_n$$

และ C_W คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$C_W = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^{x} \left(\frac{h_n}{h_i} \right)^2 \frac{A_i}{\left[1 + 0.83 \left(\frac{h_i}{D_i} \right)^2 \right]}$$

โดยที่ A_B คือพื้นที่ของฐานของอาคาร หน่วยเป็น ตารางฟุต

A_i คือพื้นที่ของ Web ของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i หน่วยเป็น ตารางฟุต

D_i คือความยาวของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i หน่วยเป็น ฟุต

h_i คือความสูงของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i หน่วยเป็น ฟุต

x คือ จำนวนกำแพงรับแรงเฉือนในอาคารที่สามารถต้านทานแรงทางด้านข้างในทิศทางที่พิจารณา

3.4.3 สูตรการประมาณของประเทศญี่ปุ่น

สูตรการประมาณของประเทศญี่ปุ่นมี 2 ส่วนได้แก่ The Building Standard Law in Japan (BSLJ) ฉบับ ค.ศ.1987 และ Architectural Institute of Japan (AIJ) มาตรฐาน AIJ-2004

สำหรับ BSLJ 1987 เสนอสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติคือ

$$T = (0.02 + 0.01\alpha)H \qquad (3.10)$$

โดยที่ α คือสัดส่วนระหว่างโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตของอาคาร โดยทำให้ได้สมการสำหรับโครงสร้างคอนกรีตคือ

$$T = 0.02H \qquad (3.11)$$

และโครงสร้างเหล็กคือ

$$T = 0.03H \qquad (3.12)$$

Architectural Institute of Japan (AIJ) ของประเทศญี่ปุ่น มาตรฐาน AIJ-2004 หัวข้อคำอธิบายสำหรับหัวข้อ 7.2 ได้แนะนำแนวทางการหาค่าคาบธรรมชาติไว้ว่า หากไม่ใช้การวิเคราะห์ eigenvalue จากสมการการเคลื่อนที่ สามารถหาค่าคาบธรรมชาติ T_1 ดังต่อไปนี้

- วิธี Weight

สำหรับค่าการโก่งตัวที่ยอดอาคารเท่ากับ δ (หน่วยเป็น เซนติเมตร) ที่ได้จากการให้แรงเฉื่อยจากน้ำหนักอาคารด้านที่พิจารณากระทำต่อตัวอาคาร ให้คำนวณ T_1 ดังนี้

$$T_1 = \frac{\sqrt{\delta}}{5} \sim \frac{\sqrt{\delta}}{5.7}$$

โดยที่สำหรับระบบแบบดีกรีแห่งความอิสระเท่ากับหนึ่งให้ใช้ $\sqrt{\delta}/5$ และระบบที่มีดีกรีแห่งความอิสระมากกว่าหนึ่งให้ใช้ $\sqrt{\delta}/5.7$

- สูตรการประมาณ ค่า T_1 สามารถประมาณจากความสูงของอาคาร h (หน่วยเมตร) สำหรับโครงสร้างที่ดัดตัวทางด้านข้างแบบเฉือน ดังนี้

$$T_1 = (0.02 + 0.01\alpha_h)h$$

โดยค่า α_h คืออัตราส่วนระหว่างโครงสร้างเหล็กต่อความสูงของโครงสร้าง

นอกจากนี้ สูตรการประมาณ T_1 ที่สัมพันธ์กับจำนวนชั้น n แสดงไว้ดังนี้

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก $T_1 = (0.06 \pm 0.02)n$

สำหรับโครงสร้างเหล็ก $T_1 = (0.1 \pm 0.03)n$

3.4.4 Eurocodes

Eurocodes ของประเทศในทวีปยุโรป Eurocode 8 EN 1998-1:2004 หัวข้อ 4.3.3.2.2 การคำนวณค่าคาบธรรมชาติสำหรับโหมดที่หนึ่ง T_1 ของอาคาร อาจใช้วิธีตามหลักพลศาสตร์โครงสร้าง เช่นวิธี Rayleigh

สำหรับอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 40 เมตร ค่า T_1 อาจประมาณได้ดังนี้

$$T_1 = C_t H^{3/4}$$

โดยที่ C_t เท่ากับ 0.085 สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็กสามมิติ เท่ากับ 0.075 สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีตสามมิติและโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยันแบบเยื้องศูนย์โครงสร้างเหล็ก และเท่ากับ 0.050 สำหรับโครงสร้างประเภทอื่น

H คือความสูงของอาคาร หน่วยเป็นเมตร วัดจากฐานรากหรือจากส่วนบนของชั้นพื้นส่วนที่แข็งแกร่ง

นอกจากนั้น สำหรับโครงสร้างที่มีกำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตหรือ masonry ใช้ค่า C_t ดังนี้

$$C_t = 0.075/\sqrt{A_c}$$

โดยที่ $A_c = \sum \left[A_i \left(0.2 + \left(l_{wi}/H \right) \right)^2 \right]$

และ A_c คือพื้นที่ประสิทธิผลรวมของกำแพงรับแรงเฉือนในชั้นแรกของอาคาร หน่วยเป็นตารางเมตร A_i คือพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผลของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i ในทิศทางที่พิจารณา ในชั้นแรกของอาคาร หน่วยเป็นตารางเมตร l_{wi} คือความยาวของกำแพงรับแรงเฉือนตัวที่ i ในชั้นแรกและในทิศทางที่ขนานกับแรงที่กระทำ หน่วยเป็นเมตร และมีค่า l_{wi}/H ไม่เกิน 0.9

นอกจากนั้น ค่า T_1 อาจประมาณได้ดังนี้

$T_1 = 2\sqrt{d}$

โดย d คือการเคลื่อนตัวทางข้างของยอดอาคารในช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่น หน่วยเป็นเมตร เนื่องจากแรงโน้มถ่วงกระทำทางด้านข้าง

3.4.5 Australian Standard

Australian Standard ของประเทศออสเตรเลีย AS 1170.4—2007 หัวข้อ 6.2.3 ค่าคาบธรรมชาติ T_1 สำหรับโหมดที่หนึ่ง ในการเคลื่อนที่ทางข้าง สามารถหาจากการวิเคราะห์โครงสร้าง หรือจากการประมาณจากสูตร ดังนี้

$T_1 = 1.25k_t h_n^{0.75}$

ค่า k_t ใช้ดังนี้

0.11 สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก

0.075 สำหรับโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต

0.06 สำหรับโครงข้อแข็งที่มีการค้ำยันแบบเยื้องศูนย์โครงสร้างเหล็ก

0.05 สำหรับโครงสร้างประเภทอื่น

ค่าแรงเฉือนที่ฐานที่คำนวณจาก T_1 ที่หาโดยการวิเคราะห์โครงสร้าง ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าที่ได้จากการคำนวณจาก T_1 ที่หาจากสูตรประมาณข้างต้น

3.4.6 British Standard

British Standard ของประเทศสหราชอาณาจักร BS EN 1998-1:2004 หัวข้อ 4.3.3.2.2 มีเนื้อหาเดียวกับ Eurocodes

3.4.7 New Zealand code

New Zealand code ของประเทศนิวซีแลนด์ NZS 1170.5:2007 หัวข้อ 4.1 ค่าคาบธรรมชาติ T_1 สามารถหาได้จากข้อมูล และ/หรือ การคำนวณ โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุและหน้าตัดที่เหมาะสม

สำหรับการวิเคราะห์โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ค่าคาบธรรมชาติในทิศทางที่พิจารณาอาจคำนวณได้ดังนี้

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(W_i d_i^{\,2}\right)}{g\sum_{i=1}^{n}\left(F_i d_i\right)}}$$

โดยที่

d_i คือ การเคลื่อนตัวในแนวราบของจุดศูนย์กลางมวลที่ระดับ i โดยไม่รวมผลของการบิด

F_i คือแรงที่กระทำที่ระดับ i

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

i คือระดับชั้นที่พิจารณาของโครงสร้าง

n คือจำนวนชั้นของโครงสร้าง

W_i คือน้ำหนักที่ใช้พิจารณาแผ่นดินไหวของชั้นที่ i

3.4.8 Mexico City Building Code

Mexico City Building Code 1995 (MCBC1995) หัวข้อ 8.2 a) ค่าคาบธรรมชาติ คำนวณได้ดังนี้ (จากหลักการของ Rayleigh)

$$T = 6.3 \times \sqrt{\frac{\sum\left(W_i x_i^{\,2}\right)}{g\sum\left(P_i x_i\right)}}$$

โดยที่

W_i คือน้ำหนักของชั้นที่ i

P_i คือแรงทางด้านข้าง ซึ่งคำนวณจากแรงเฉือนที่ระดับ i กระทำที่มวลนั้น

x_i คือ การเคลื่อนตัวในแนวของแรงทางด้านข้าง

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

3.4.9 กฎกระทรวงแผ่นดินไหวฯ พ.ศ. 2550

คาบธรรมชาติของอาคาร (T) ถ้าไม่สามารถ คำนวณหา คาบธรรมชาติของอาคารได้ถูกต้องโดยวิธีอื่น ให้คำนวณตามสูตรดังต่อไปนี้

1. สำหรับอาคารทั่วไปทุกชนิด ให้คำนวณตามสูตร $T = \dfrac{0.09h_n}{\sqrt{D}}$

2. สำหรับโครงข้อแข็งที่มีความเหนียว ให้คำนวณตามสูตร $T = 0.1N$

โดยที่ h_n คือ ความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุดวัดจากระดับพื้นดินมีหน่วยเป็นเมตร D คือ ความกว้างของโครงสร้างของอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นเมตร และ N คือจำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

ในการเปรียบเทียบสูตรการประมาณคาบธรรมชาติ T_1 สำหรับแต่ละมาตรฐานที่จำแนกลักษณะของโครงสร้างไว้เหมือนกัน ได้แก่ โครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก และโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต โดยแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ (H คือความสูงของอาคาร หน่วยเป็นเมตร และ n คือจำนวนชั้นของอาคาร)

ตารางที่ 3.4 สูตรการประมาณคาบธรรมชาติของโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างเหล็ก

Standard or Code	T_1
NBCC 2005	$0.085(H)^{3/4}$
ASCE 7-05	$0.0724H^{0.8}$
BSLJ 1987	$0.03H$
AIJ 2004	$(0.1 \pm 0.03)n$
Eurocode 8 EN 1998-1:2004 and BS Code	$0.085(H)^{3/4}$
AS 1170.4-2007	$0.1375(H)^{3/4}$
NZS 1170.5:2007	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
MCBC1995	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
กฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550	$\frac{0.09h_n}{\sqrt{D}}$ หรือ $0.1N$ โดยไม่จำแนกว่าสำหรับโครงสร้างเหล็กหรือคอนกรีต

ตารางที่ 3.5 สูตรการประมาณคาบธรรมชาติของโครงข้อแข็งรับโมเมนต์โครงสร้างคอนกรีต

Standard or Code	T_1
NBCC 2005	$0.075(H)^{3/4}$
ASCE 7-05	$0.0466H^{0.9}$
BSLJ 1987	$0.02H$
AIJ 2004	$(0.06 \pm 0.02)n$
Eurocode 8 EN 1998-1:2004 and BS Code	$0.075(H)^{3/4}$
AS 1170.4-2007	$0.09375(H)^{3/4}$
NZS 1170.5:2007	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
MCBC1995	มีเฉพาะสูตรคำนวณโดยหลักการของ Rayleigh
กฎกระทรวงแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550	$\frac{0.09h_n}{\sqrt{D}}$ หรือ $0.1N$ โดยไม่จำแนกว่าสำหรับโครงสร้างเหล็กหรือคอนกรีต

3.5 คลื่นแผ่นดินไหว (Seismic Wave)

คลื่นแผ่นดินไหว แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

3.5.1 Body Wave เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทุกที่ภายในโลกและแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ P Wave หรือ Primary Wave มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบอัดและยืดขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและเป็นคลื่นแรกที่มาถึงสถานีตรวจวัด เนื่องจากมีความเร็วสูงสุดและสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในตัวกลางที่เป็นของแข็งและของเหลวและ S Wave หรือ Secondary Waveหรือ Shear Wave มีลักษณะการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นสามารถเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็งเท่านั้น มีความเร็วน้อยกว่า P Wave

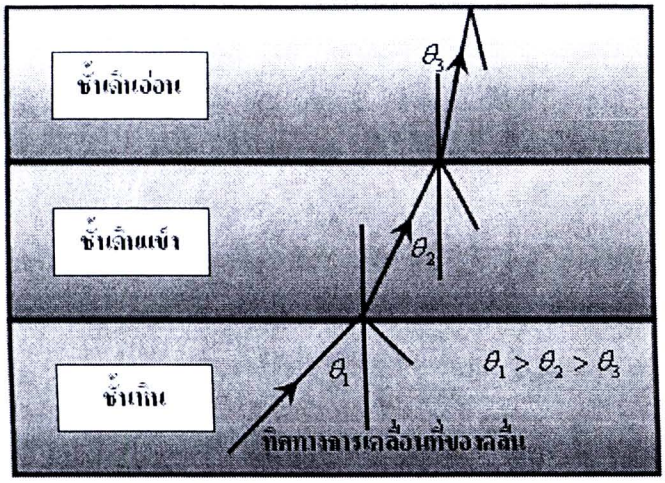
3.5.2 Surface Wave เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีสามารถเคลื่อนที่ไปตามผิวบนของเปลือกโลกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Rayleigh Wave มีการเคลื่อนที่ทั้งแนวตั้งและแนวนอนกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและ Love Wave มีการเคลื่อนที่ขวางกับการเคลื่อนที่ของคลื่น S wave

จากคลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมดคลื่นที่ทำความเสียหายรุนแรงมาก คือ Rayleigh Wave และ Shear Wave โดยเมื่อ Body Wave เคลื่อนที่ในชั้นดินและชั้นหินจะเกิดการหักเหและการสะท้อนของคลื่นตามกฎของ Snell's Law

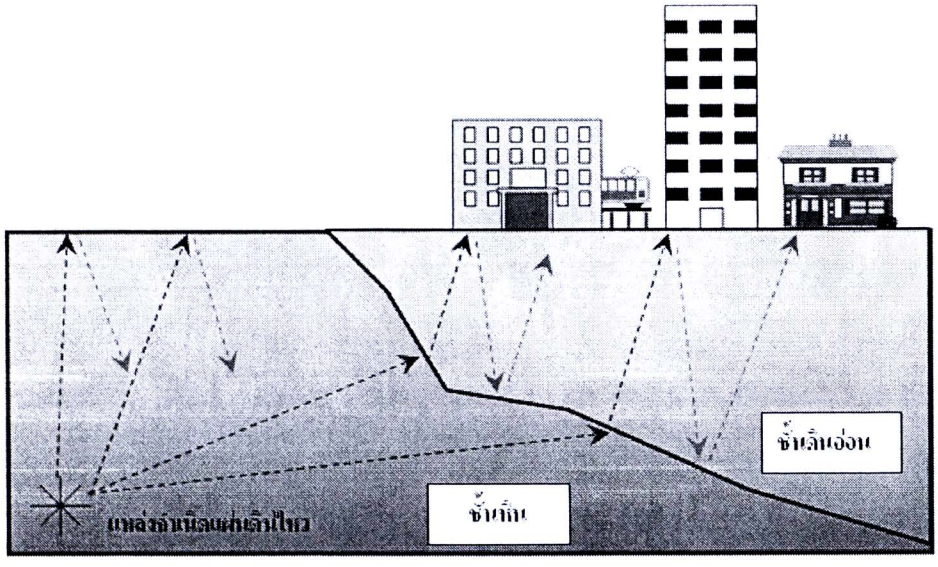
$$\frac{Sin\ i}{V_i} = \frac{Sin\ r}{V_2} \tag{3.13}$$

เมื่อ Sin i = Sinของมุมตกกระทบ,Sin r = Sinของมุมสะท้อน, V_1และ V_2เป็นความเร็วคลื่นในตัวกลาง

ความเร็วของคลื่น Shear Wave จะน้อยกว่าในชั้นดินอ่อนเมื่อเทียบกับชั้นดินแข็ง และจากกฎของ Snell's Law ทำให้ Transverse Wave จะเดินทางเกือบจะตั้งฉากสู่พื้นดิน(รูปที่ 3.6) เนื่องจากแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่แนวราบตั้งฉากกับทิศของการเคลื่อนที่ของคลื่น นอกจากนี้ในชั้นดินอ่อนมีปรากฏการณ์การสะท้อนกลับคลื่นกลับไปกลับมาของคลื่นแผ่นดินไหว(Multi Reflection Phenomenon) ซึ่งในชั้นดินอ่อนคลื่นสามารถผ่านไปด้านบนได้ง่าย ในขณะที่ชั้นดินแข็งจะมีการสะท้อนของคลื่นกลับได้(รูปที่ 3.7) ด้วยเหตุที่เหมือนกับการดักคลื่นแผ่นดินไหวนี้ไว้สามารถทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ที่สูงขึ้น เป็นเหตุให้ผิวดินจะมีการสั่นอย่างรุนแรงได้



รูปที่ 3.6 แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นแผ่นดินไหวตามกฎของ Snell's Law



รูปที่ 3.7 ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับคลื่นกลับไปกลับมาของคลื่นแผ่นดินไหว

3.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิธี H/V Spectrum Ratio

ในปี ค.ศ.1989 Nakamura ได้ปรับปรุงการการตรวจวัด Microtremor โดยการเสนอเทคนิคใหม่ คือ H/V Method ในเทคนิคนี้โดยการใช้ Horizontal Spectra Amplitude และ Vertical Spectra Amplitude วิธีนี้ทำให้มีสมมติฐาน คือ

1. Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลักคือ Shear Wave
2. การสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง (Vertical Component) จะไม่มีการขยายในชั้นดินอ่อน โดยจะมีเพียง การสั่นสะเทือนในแนวราบ (Horizontal component) เท่านั้นที่มีการขยาย

3. ไม่มีการขยายคลื่นในทุก ทิศทางในชั้นหิน

4. Rayleigh Wave ถูกสมมุติฐานเป็นคลื่นรบกวน

Nakamura แสดงให้เห็นว่า H/V Spectrum Ratio เกือบจะเท่ากับ S-Wave Transfer Function ระหว่างพื้นดินและชั้นหินด้านล่าง ซึ่งกล่าวคือ H/V Peak Period คือคาบธรรมชาติของที่ตั้งและค่าตอบสนองสูงสุดคือ ค่าการขยายคลื่น (Amplification Factor) ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้การเจาะสำรวจดิน วิธีนี้จึงสะดวกและประหยัดในการใช้งาน วิธีนี้มีการใช้อย่างกว้างขวาง

ทฤษฎี H/V Method ที่เสนอโดย Nakamura

ให้ Transfer Function ในแต่ละชั้นเขียนได้ดังสมการ

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \tag{3.14}$$

S_T = Transfer Function

S_{HS}= Horizontal Tremor Spectrum ของดินชั้นบนสุด

S_{HB}= Horizontal Tremor Spectrum ของการตกกระทบของคลื่นจากชั้นหินด้านล่างถึงดินชั้นบนสุด

จากสมมติฐาน S_{HS} มีผลกระทบมาจาก Surface Wave คือผลมาจาก Rayleigh Wave โดยผลกระทบของ Rayleigh Wave ซึ่งจะพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนโดยมีผลต่อ The Vertical Spectrum ของดินชั้นบนสุด (S_{VS}) แต่ไม่มีผลต่อ Vertical Spectrum ของชั้นหินด้านล่าง (S_{VB}) และจากสมมติฐานที่ว่าจะไม่มีการขยายคลื่นในส่วนของการสั่นในแนวดิ่ง (Vertical Tremor) ในชั้นดินอ่อน ดังนั้น ปริมาณ E_S คือผลของ Rayleigh Wave ที่มีในการสั่นในแนวดิ่ง (Vertical Tremor) ดังสมการที่ 3.15

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \tag{3.15}$$

E_S= ผลของ Rayleigh Wave ที่มีในการสั่นในแนวดิ่ง (Vertical Tremor)

S_{VS}= Horizontal Tremor Spectrum ของดินชั้นบนสุด

S_{VB}= Horizontal Tremor Spectrum ของชั้นหินด้านล่าง

โดยถ้าไม่มีผลของ Rayleigh Wave E_S=1 ถ้า Es มากกว่า 1 ผลกระทบของ Rayleigh Wave ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

สมมติผลของ Rayleigh Wave เท่ากันทั้งแนวราบและแนวดิ่ง

S_T/E_S เป็น Transfer Function (S_{TT}) ที่ตัดผลกระทบของ Rayleigh Wave แล้วจะได้ว่า

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{R_S}{R_B} \tag{3.16}$$

โดยที่ $R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}$

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}}$$

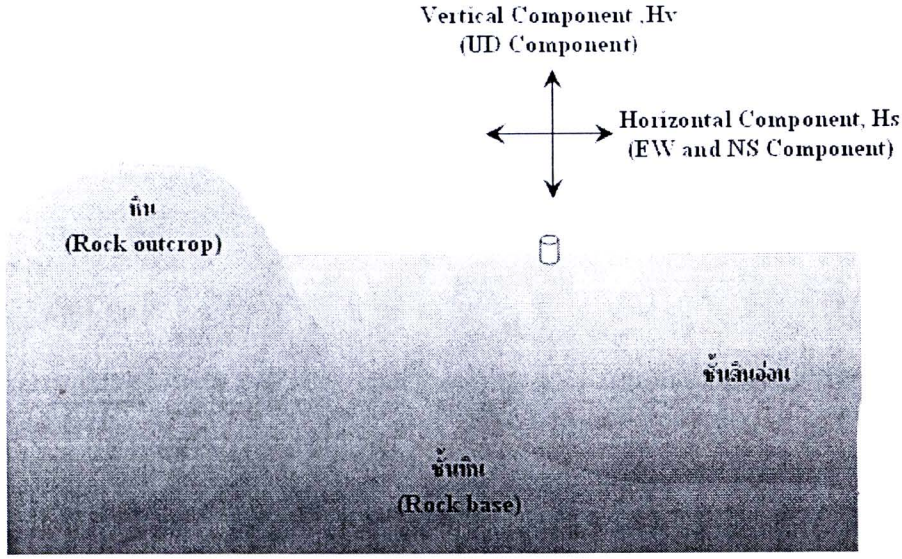
จากสมมติฐานที่ว่าไม่มีการขยายคลื่นในทุกทิศทางในชั้นหินดังนั้น $R_B = 1$ ซึ่งแสดงว่า Transfer Function ของ Shear Wave ที่ตัดผลของ Rayleigh Wave แล้วจะได้ว่า

$$S_{TT} = R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \qquad (3.17)$$

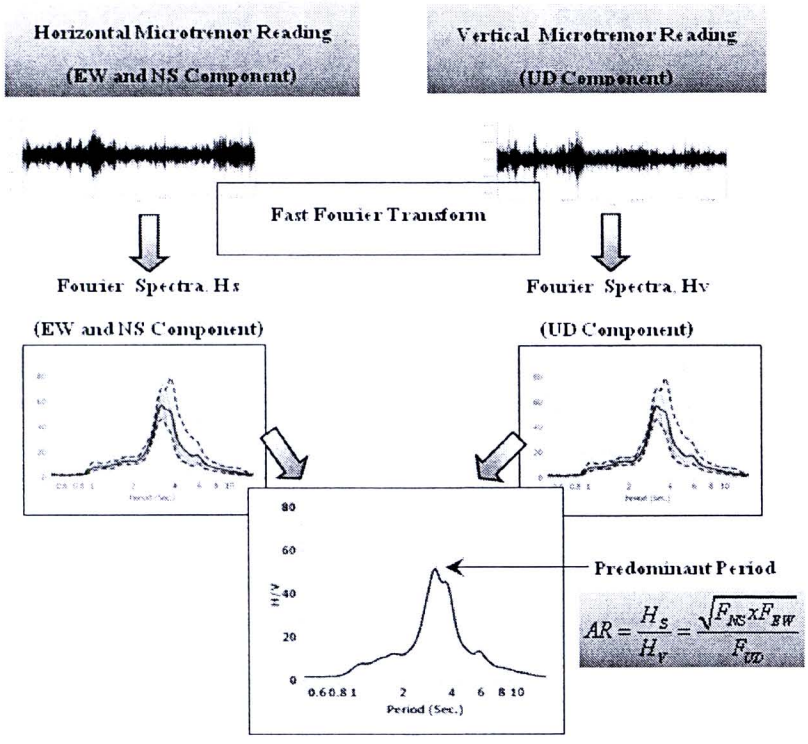
ดังนั้นจึงแสดงว่า ค่าการขยายคลื่น (Amplification Factor) ของส่วนประกอบในแนวดิ่งสามารถประมาณค่าได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าสเปคตรัมสูงสุดของในแนวดิ่งกับสเปคตรัมสูงสุดของในแนวราบที่พื้นดินชั้นบน และคาบสูงสุดของอัตราส่วนระหว่างสเปคตรัมดังกล่าวเปรียบเสมือนคาบธรรมชาติ (Predominant Period) บริเวณสถานที่นั้น ๆ

การวิเคราะห์ผลโดยวิธี H/V Spectrum Ratio

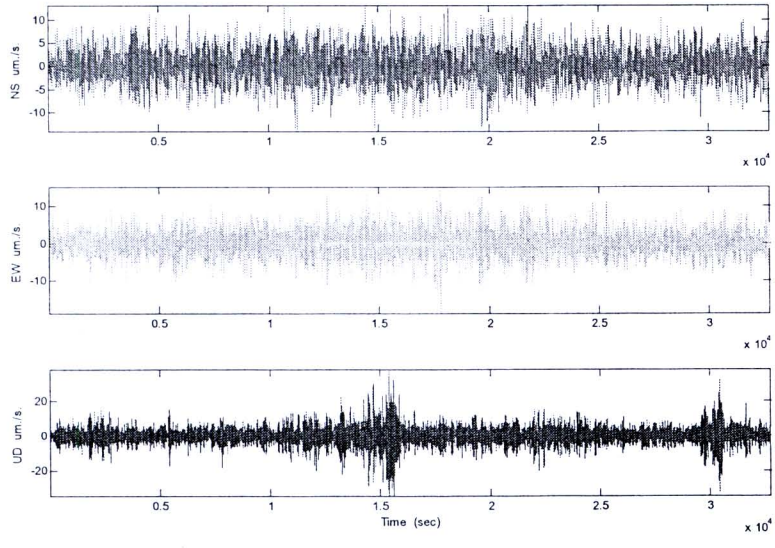
ในปี ค.ศ. 1989 Nakamura ได้เสนอวิธี H/V Method โดยใช้การตรวจวัดสถานที่ละ 1 จุด และผลการตรวจวัดต้องไม่มีการรบกวนจากสัญญาณอื่นๆ โดย วิธี H/V Method นี้จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของส่วนประกอบฟูเรียร์สเปคตรัมในแนวราบ (Fourier Spectrum of Horizontal Component, H_S) กับส่วนประกอบฟูเรียร์สเปคตรัมในแนวดิ่ง (Fourier Spectrum of Vertical Component , H_V) ซึ่งส่วนประกอบฟูเรียร์สเปคตรัมในแนวราบ (Fourier Spectrum of Horizontal Component, H_S) กับส่วนประกอบฟูเรียร์สเปคตรัมดิ่ง (Fourier Spectrum of Vertical Component , H_V) ดูจากรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดง H_S และ H_V ตามวิธี H/V Spectrum Ratio



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลโดยวิธี H/V Spectrum Ratio



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่าง Microtrmor Data –NS, EW and UD Component

ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์วิธี H/V Spectral Ratio แสดงในรูปที่ 3.9 และตัวอย่างสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากการสั่นของคลื่นผิวดินแสดงในรูปที่ 3.10

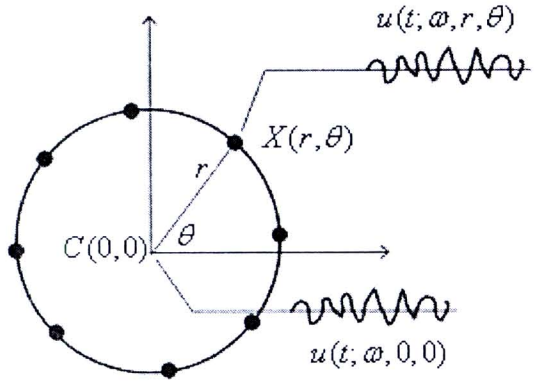
โดยถ้า Fourier Amplitude Spectra จาก Microtremor ในทิศเหนือ-ใต้ (NS), ตะวันออก-ตะวันตก(EW), ขึ้น-ลง (UD) เขียนแทนด้วย F_{NS} F_{EW} F_{UD} ดังนั้น Fourier Amplitude Ratio (AR) ของ Mirotemor ซึ่งคือวิธี H/V Spectral Ratio จะได้ว่า

$$AR = \frac{H_S}{H_V} = \frac{\sqrt{F_{NS} x F_{EW}}}{F_{UD}} \tag{3.18}$$

3.7 วิธี Spatial Autocorrelation (SPAC) และ 2sSPAC

3.7.1 ทฤษฎีของวิธี SPAC และ 2sSPAC

วิธี Spatial Autocorrelation (SPAC) ซึ่งเป็นวิธีสำหรับประมาณค่า ความเร็วเฟส (Phase Velocity) ของชั้นดิน ซึ่งนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีคำนวณกลับเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนได้ วิธีนี้ได้เสนอไว้โดย Aki (1957) ในปี 1957 โดยต้องมีการเก็บข้อมูลการสั่นของคลื่นผิวดินในแนวดิ่งที่หลายจุดพร้อมกัน (Array) ที่ระยะทางจากจุดคงที่จุดใด ๆ เป็นระยะเท่ากัน ดังตัวอย่างรูปแบบวงกลมที่แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปแบบการวัดแบบ Array โดยวิธี SPAC

จากรูปที่ 3.11 กำหนดให้

r = รัศมีของ Array สำหรับการตรวจวัด

ω = ความถี่ในการสั่นขององค์ประกอบคลื่นในแนวดิ่ง

$u(t;,\omega,0,0)$ = องค์ประกอบคลื่นในแนวดิ่ง ที่จุด $C(0,0)$

$u(t;,\omega,r,0)$ = องค์ประกอบคลื่นในแนวดิ่ง ที่จุด $X(r,\theta)$

องค์ประกอบคลื่นในแนวดิ่ง ประกอบด้วยคลื่นพื้นฐานคือ Rayleigh Wave ดังนั้น Spatial autocorrelation function (SPAC function) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\phi(\omega;r,\theta) = \langle u(t;\omega,0,0).u(t;\omega,r,\theta) \rangle \tag{3.19}$$

ซึ่งเครื่องหมาย $\langle\ \rangle$ คือค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเวลา T ที่พิจารณา

และ Spatial autocorrelation coefficient (SPAC coefficient) คือค่าเฉลี่ยของ SPAC function รอบจุดที่ตรวจวัดซึ่งเป็นวงกลม สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\rho(\omega;r)=\frac{1}{2\pi\cdot\phi(\omega;0,0)}\int_0^{2\pi}\phi(\omega;r,\theta)d\theta \tag{3.20}$$

$\phi(\omega;0,0)$ เป็น Autocorrelation function ที่จุด $C(0,0)$ หลังจากทำการอินทิเกรทสมการที่ 3.20 สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.21

$$\rho(\omega;r)=J_0(\frac{\omega r}{c(\omega)}) \tag{3.21}$$

ซึ่ง J_0 = The Bessel function of the first kind with zero order

$c(\omega)$ = Phase Velocity ของ ความถี่ ω ($\omega=2\pi f$)

SPAC coefficient สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ 3.20 และสามารถคำนวณได้ใน Frequency domain โดยใช้ Fourier transform แสดงได้ดังสมการที่ 3.22

$$\rho(\omega;r)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{real[S_{CX}(\omega;r,\theta)]}{\sqrt{S_C(\omega;0,0)\cdot S_X(\omega;r,\theta)}}d\theta \tag{3.22}$$

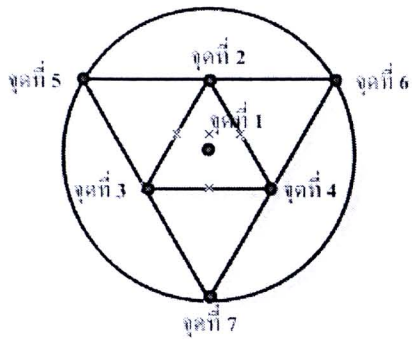
ซึ่ง real[.]=ส่วนของจำนวนจริงของจำนวนเชิงซ้อน

$S_C(\omega;0,0)$ = The power spectrum ของจุด C(0,0)

$S_X(\omega;r,\theta)$ = The power spectrum ของจุด X(r, θ)

$S_{CX}(\omega;r,\theta)$ = The cross spectrum ระหว่าง $u(t;\omega,0,0)$ และ $u(t;\omega,r,\theta)$

ตำแหน่งในการตรวจวัด จำเป็นต้องมีรัศมีของ Array ที่แตกต่างกันเพื่อให้ครอบคลุมองค์ประกอบของความยาวคลื่น (Wave length) ได้อย่างเพียงพอ และในแต่ละ Array ต้องกำหนดจุดศูนย์กลางวงกลมและอีก 3 จุดบนรูปสามเหลี่ยม รวม 4 จุดสำหรับ 1 Array ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.12 ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจวัดพร้อมกันอย่างน้อย 4 ถึง 7 จุด

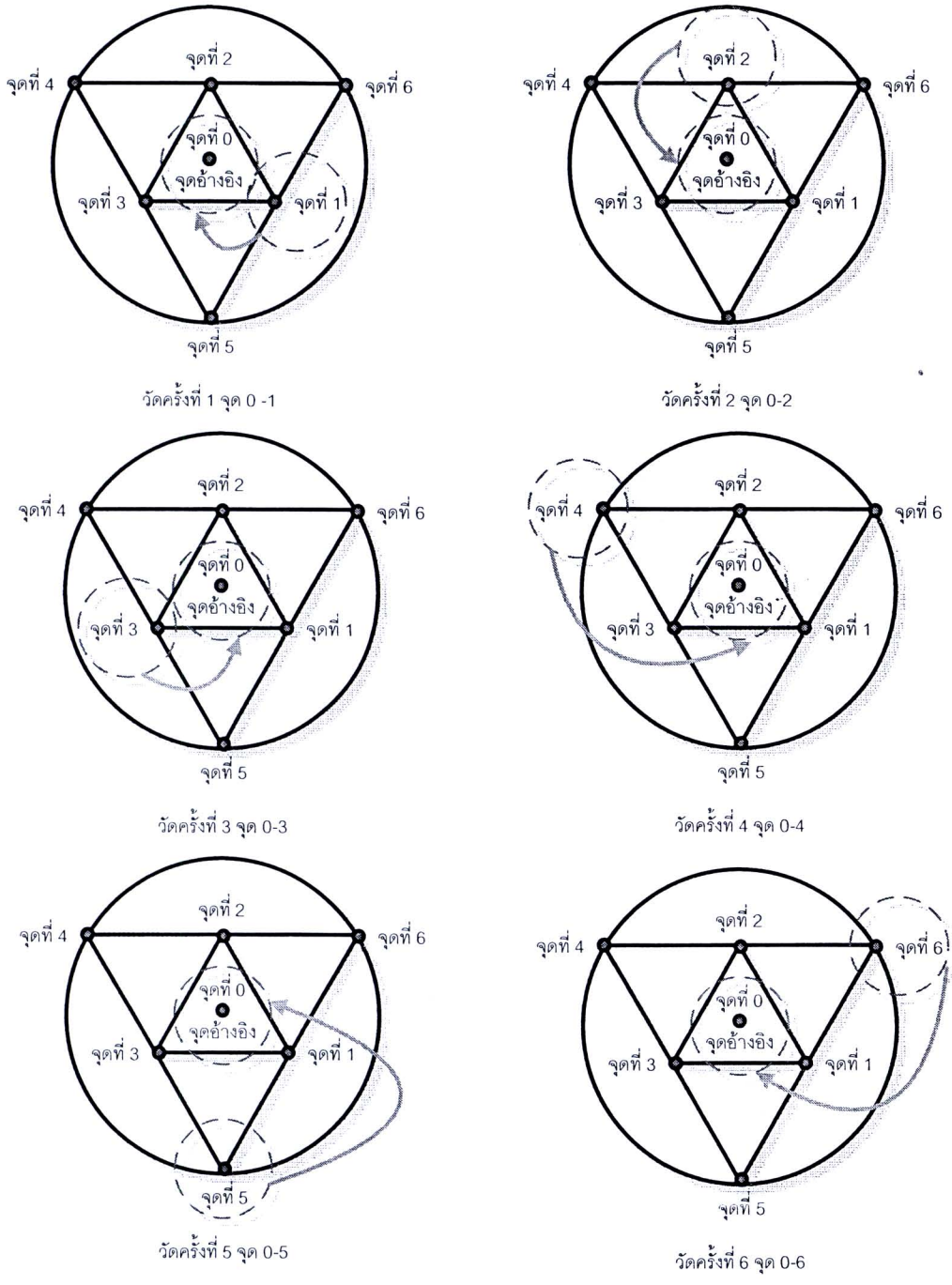


รูปที่ 3.12 รูปแบบการวัดแบบ Array โดยวิธี SPAC

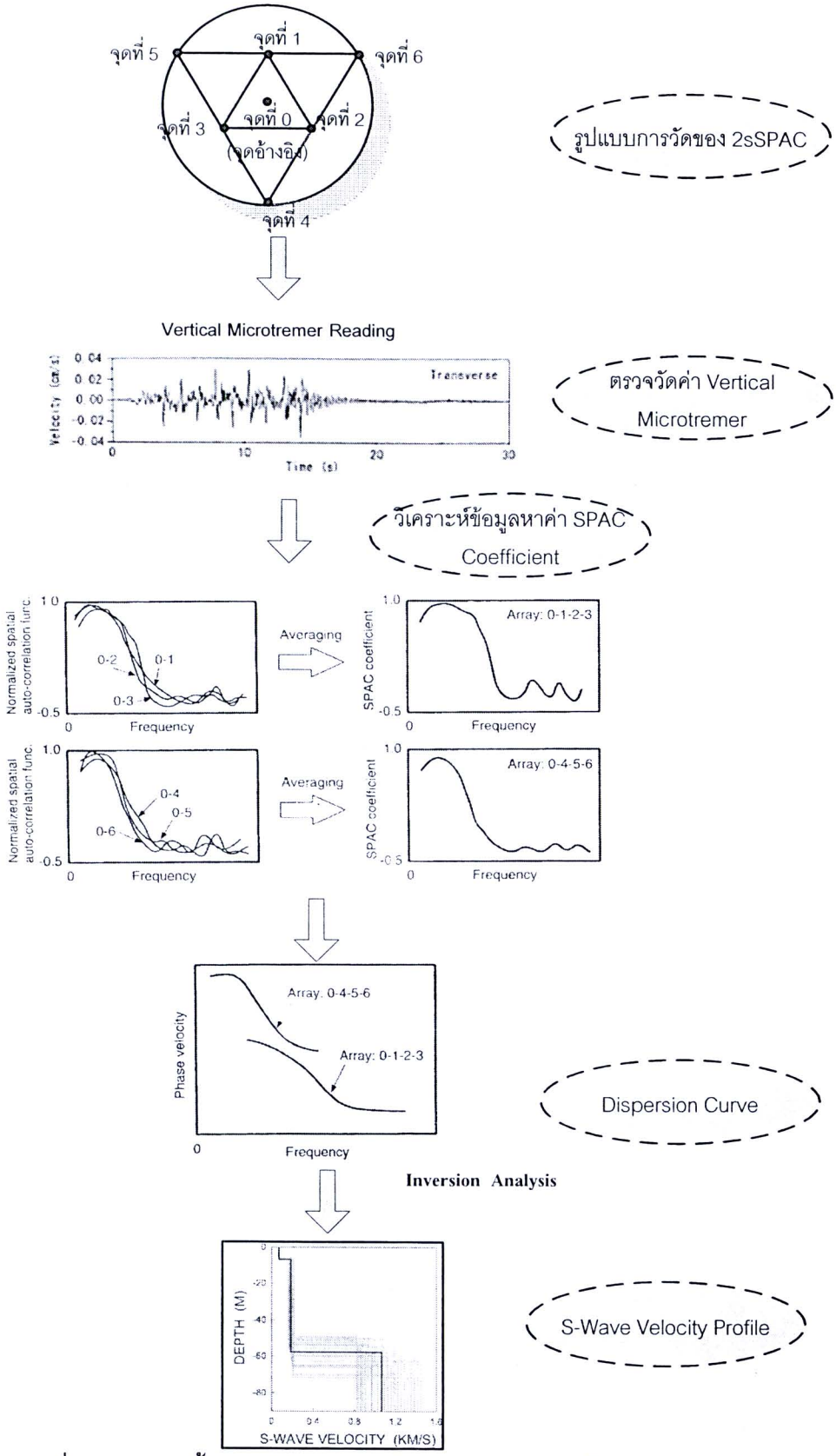
Morikawa (2004) เสนอว่าการตรวจวัดพร้อมกันจำนวนหลายจุดนั้น จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และบุคลากรจำนวนมาก จึงเสนอแนวทางที่เหมาะสมขึ้นในการปฏิบัติ โดยแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของ SPAC Coefficient ไม่ขึ้นกับเวลาของการตรวจวัดในแต่ละคู่ของจุด C(0,0)และ X(r, θ) ถ้าคลื่นผิวดินมีลักษณะคงตัว ทั้งด้านตำแหน่ง(Spatial) และเวลา (Temporally) คงที่ ซึ่งหมายความว่าสามารถหาค่า SPAC Coefficient จากการวัด 2 จุดในเวลา เดียวกันที่จุด $C(0,0)$ และ $X(r,\theta)$ แทนที่จะวัดพร้อมกันหมดทั้งรูปแบบ และปรับสมการที่ 3.22 ให้ทำการอินทิเกรทในแต่ละมุม θ ของแต่ละคู่ที่ทำการตรวจวัดเท่านั้น ทำให้สามารถดำเนินการศึกษาได้โดยใช้อุปกรณ์และบุคลากรเพียง 2 ชุด เท่านั้น

3.7.2 วิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี 2sSPAC

ขั้นตอนการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี 2sSPAC สามารถอธิบายด้วยรูปที่ 3.13 และภาพรูปที่ 3.14 ซึ่งมีจุดวัดทั้งหมด 7 จุด โดยวิธี 2sSPAC ต้องทำการกำหนดจุดอ้างอิง 1 จุด คือ จุดที่ 1 และในการตรวจวัดจะตรวจวัดเป็นคู่พร้อมกันคือ จุดที่ 1-2, จุดที่ 1-3, จุดที่ 1-4 สำหรับรัศมีเล็ก และ จุดที่ 1-5, จุดที่ 1-6, จุดที่ 1-7 สำหรับรัศมีใหญ่ โดยจะทำการวัดทั้งหมด 6 ครั้งและมีกลุ่มชุดข้อมูล 2 กลุ่มที่มีรัศมีการวัดต่างกัน จากนั้นจะใช้สมการที่ 3.22 ในการหาค่า SPAC Coefficient ($\rho(\omega;r)$) ในแต่ละชุดข้อมูล แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยกราฟที่แสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง SPAC Coefficient และความถี่ขององค์ประกอบคลื่น หลังจากนั้นทำการคำนวณ Dispersion Curve ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Velocity ($c(\omega)$) และความถี่ ขั้นตอนสุดท้ายคือใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis) เพื่อคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (Shear Wave Velocity Profile)



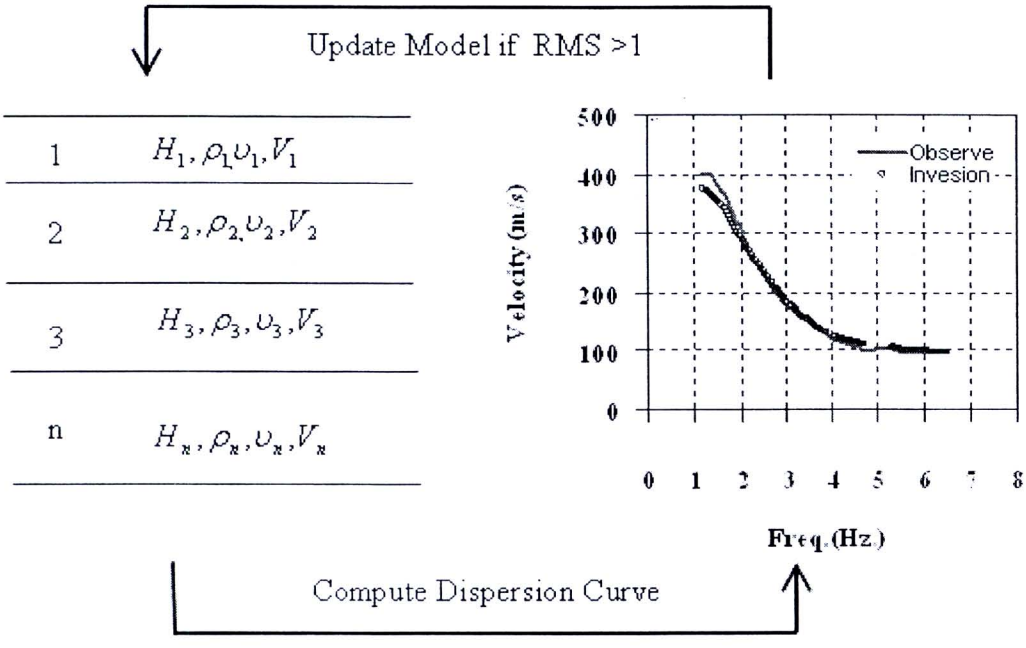
รูปที่ 3.13 แสดงรูปแบบการวัดโดยวิธี 2sSPAC



รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนวิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์โดยวิธี 2sSPAC

3.7.3 วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis)

การคำนวณแบบย้อนกลับเป็นการคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกของชั้นดิน (Shear Wave Velocity Profile) โดยเริ่มต้นป้อนข้อมูลสมมติสภาพทางธรณีวิทยาของตำแหน่งที่ตรวจวัดซึ่งจากรูปที่ 3.15 จะมีค่าที่ต้องสมมุติสำหรับการการคำนวณแบบย้อนกลับ คือความหนาของชั้นดินความหนาแน่นของดิน ค่าปัวส์ซองของดิน และค่าความเร็วคลื่นเฉือนเริ่มต้น แล้วจึงคำนวณหา Dispersion Curve จากสภาพที่สมมติ ซึ่งขั้นตอนจะสิ้นสุดลงเมื่อ Dispersion Curve ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการตรวจวัด ในการศึกษานี้ใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ โดยใช้โปรแกรม Surface Wave Modal Inversion (Swami) ซึ่งพัฒนาโดย Lai and Rix (1998) โดยโปรแกรมนี้ใช้หลักการ Occam algorithm



รูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนวิธีวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion Analysis)

3.7.4 รูปแบบการวางหัววัดเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับ วิธี 2-site Spatial Autocorrelation (2sSPAC)

รูปแบบการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ 3 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 3.16 ถึง รูปที่ 3.17 ซึ่งในแต่ละรูปแบบมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับ Circular Array รูปแบบที่ 1 แสดงในรูปที่ 3.16 เป็นรูปแบบที่ใช้จำนวนจุดในแต่ละรัศมีจำนวน 4 จุดและมี 3 รัศมี ซึ่งเมื่อเชื่อมต่อแต่ละจุดในแต่ละรัศมีเข้าด้วยกันจะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า และมุมที่วัดในแต่ละจุดต่างกัน 120 องศา โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้ ดังนี้

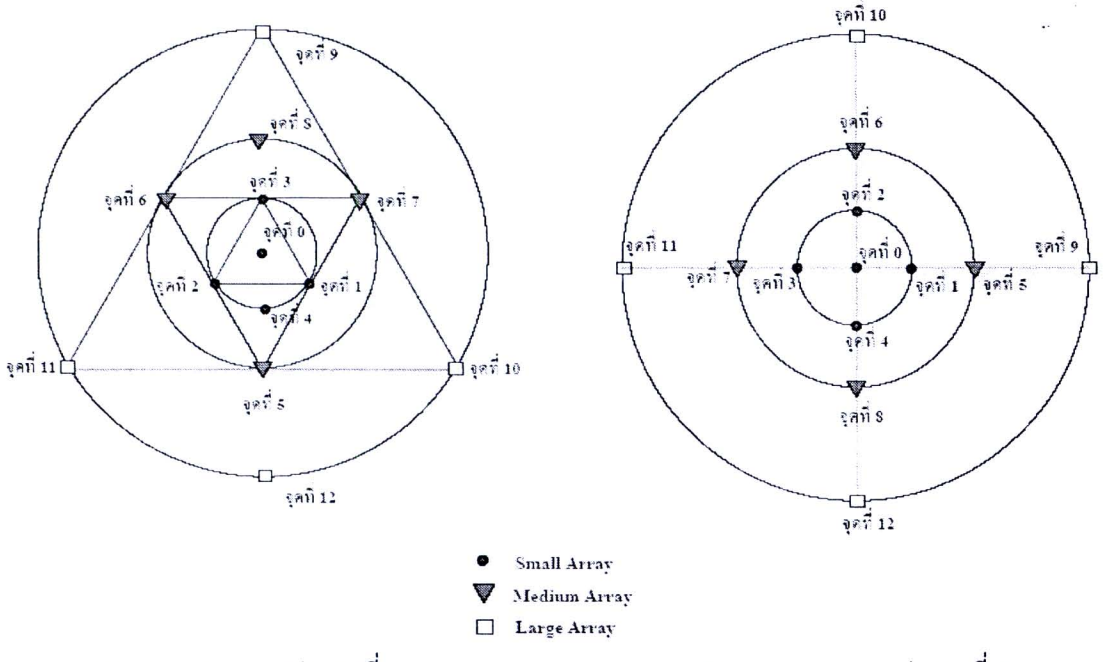
- รัศมีเล็ก (Small Array) ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลคือ 0-1 ,0-2 และ 0-3
- รัศมีกลาง (Medium Array) ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลคือ 0-5 ,0-6 และ 0-7
- รัศมีใหญ่ (Large Array) ได้ข้อมูล 3 ชุดข้อมูลคือ 0-9 ,0-10 และ 0-11

สำหรับ Circular Array รูปแบบที่ 2 แสดงในรูปที่ 3.16 เป็นรูปแบบที่ใช้จำนวนจุดในแต่ละรัศมีจำนวน 5 จุดและมี 3 รัศมี และมีมุมที่วัดในแต่ละจุดต่างกัน 90 องศา โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้ มีดังนี้

- รัศมีเล็ก (Small Array) ได้ข้อมูล 4 ชุดข้อมูลคือ 0-1 ,0-2 ,0-3 และ 0-4
- รัศมีกลาง (Medium Array) ได้ข้อมูล 4 ชุดข้อมูลคือ 0-5 ,0-6 ,0-7 และ 0-8
- รัศมีใหญ่ (Large Array) ได้ข้อมูล 4 ชุดข้อมูลคือ 0-9 ,0-10 ,0-11 และ 0-12

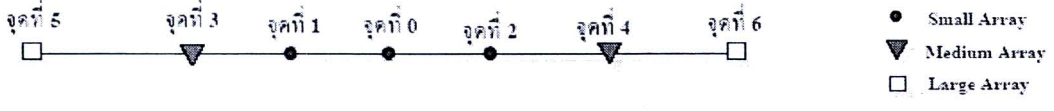
สำหรับ Linear Array แสดงในรูปที่ 3.17 เป็นรูปแบบที่ใช้จำนวนจุดในแต่ละรัศมีจำนวน 3 จุดและมี 3 รัศมี และมีมุมที่วัดในแต่ละจุดต่างกัน 180 องศา โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้ มีดังนี้

- รัศมีเล็ก (Small Array) ได้ข้อมูล 2 ชุดข้อมูลคือ 0-1 และ 0-2
- รัศมีกลาง (Medium Array) ได้ข้อมูล 2 ชุดข้อมูลคือ 0-3 และ 0-4
- รัศมีใหญ่ (Large Array) ได้ข้อมูล 2 ชุดข้อมูลคือ 0-5 และ 0-6



Circular Array รูปแบบที่ 1 Circular Array รูปแบบที่ 2

รูปที่ 3.16 การเก็บข้อมูลแบบ Circular Array



รูปที่ 3.17 การเก็บข้อมูลแบบ Linear Array

3.8 การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกประเภทของดินแต่ละบริเวณ จะสามารถทำได้โดยเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_S) ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (S_u) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกผ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (ค่า N) และนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวไปเปรียบเทียบตาม National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP 2003) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การจำแนกประเภทของดินตาม NEHRP (2003)

Soil Class	Soil Type	$\overline{V}_s$ (m/s)	$\overline{S}_u$ (kPa)	$\overline{N}$ (blow/ft)
A	Hard Rock	$\overline{V}_s$ >1500	--	--
B	Rock	760 < $\overline{V}_s$ ≤1500	--	--
C	Very dense soil and soft rock	360 < $\overline{V}_s$ ≤760	$\overline{S}_u$ < 50	$\overline{N}$ < 15
D	Dense/Stiff soil	180 < $\overline{V}_s$ ≤360	50 ≤ $\overline{S}_u$ ≤100	15 ≤ $\overline{N}$ ≤50
E	Loose/Soft soil	180 < $\overline{V}_s$	$\overline{S}_u$ > 100	$\overline{N}$ > 50

วิธีการเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_S) ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (S_u) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกผ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (ค่า N) ตามมาตรฐานดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการ

$$\overline{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{V_{si}}} \tag{3.23}$$

$$\overline{S}_u = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{S_{ui}}} \tag{3.24}$$

$$\overline{N} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{N_i}} \tag{3.25}$$

โดยที่ $\overline{S}_u$ คือค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก

$\overline{V}_s$ คือค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก

$\overline{N}$ คือจำนวนครั้งในการตอกกระบอกผ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุตเฉลี่ยสำหรับ 30 เมตรแรก

n คือจำนวนชั้นดินใน 30 เมตรแรก

d_i คือความหนาของชั้นดินชั้นที่ i

N_i คือจำนวนครั้งในการตอกกระบอกผ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุตในชั้นที่ i

V_{si} คือความเร็วคลื่นเฉือนของดินชั้นที่ i

S_{ui} คือค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินชั้นที่ i